

УДК 539.389.2

ОЦЕНКА ВКЛАДОВ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ В УПРОЧНЕНИЕ НИТРОЦЕМЕНТОВАННОЙ СТАЛИ

Малиновская В. А.*, Попова Н. А., Козлов Э. В.

Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск,
kozlov@tsuab.ru

**Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк,*
Malina_30@mail.ru

Повышение надежности и увеличение долговечности деталей машин, инструментов и конструкций выражают количественными показателями механических свойств металлических сплавов. Типичными характеристиками, применяющимися для этих изделий, являются: предел текучести, деформационное упрочнение, напряжение разрушения и др.

Нитроцементация, а также последующая термическая обработка стали связана с перераспределением атомов углерода и азота в твердом растворе, в карбидной и карбонитридной фазах и расположением их на дислокациях. Интенсивность упрочнения и охрупчивания стали при прочих равных условиях должна зависеть от количества атомов С и N, способных к указанному перераспределению. Углерод и азот увеличивают твердорастворное упрочнение, закрепляют дислокации. При всех этих превращениях изменяется субструктура, плотность дислокаций, внутренние напряжения, плотность границ.

Проведенные количественные исследования параметров структуры исследуемой конструкционной стали мартенситного класса 20Х2Н4А, прошедшей процесс поверхностного насыщения азотом и углеродом (нитроцементация) и последующие этапы термической обработки, позволяют проследить за процессом перераспределения атомов (С+N), перераспределением плотности дислокаций, субструктуры и выполнить оценку предела текучести различных слоев в данной стали в зависимости от расстояния до нитроцементованной поверхности образца.

К настоящему времени установлено, что высокая прочность стали с мартенситной структурой определяется многими факторами, основными из которых являются: наличие атомов углерода и легирующих элементов, находящиеся в твердом растворе; высокая плотность дислокаций, образующихся при мартенситном превращении; наличие в стали зон предвыделений и частиц карбонитридных фаз; наличие границ зерен, пакетов и кристаллов мартенсита [1-4]. На основании многочисленных теоретических и экспериментальных исследований получен целый ряд соотношений, позволяющих установить количественную связь параметров тонкой структуры стали с её механическими свойствами [5]. В некоторых работах, выполненных в данной области, приводится рассмотрение лишь отдельных структурных факторов, участвующих в упрочнении стали [1, 6]. Однако существуют работы, в которых проведен более полный анализ параметров тонкой структуры и механизмов упрочнения стали [2-4, 7].

В настоящей работе, согласно известным представлениям [2-7], расчет предела текучести проводился по формуле (1), где квадратично складывались вклады упрочнения дислокациями «леса» и упрочних полей, остальные вклады складывались аддитивно:

$$\sigma = \Delta\sigma_n + \Delta\sigma_{ms} + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_c + \Delta\sigma_{op} + \sqrt{(\Delta\sigma_d^2 + \Delta\sigma_s^2)}. \quad (1)$$

Формула (1) охватывает практически все вклады сопротивлению деформирования. В этой формуле $\Delta\sigma_n$ – напряжение трения дислокаций в кристаллической решетке α -железа; $\Delta\sigma_{тв}$ – упрочнение твердого раствора на основе феррита атомами легирующих элементов; $\Delta\sigma_d$ – упрочнение дислокациями «леса», которые перерезают скользящие дислокации; $\Delta\sigma_c$ – субструктурное упрочнение, связанное с торможениями сдвигов на границах реек; $\Delta\sigma_o$ – упрочнение дальнедействующими полями напряжений; $\Delta\sigma_{op}$ – упрочнение материала некогерентными частицами при обходе их дислокациями по механизму Орована; $\Delta\sigma_z$ – упрочнение за счет границ зерен.

Матрица стали состоит из α - и γ -фаз. Морфологически структура α -фазы представлена отпущенным мартенситом (пакетным и пластинчатым низко- и высокотемпературным) и верхним бейнитом; γ -фаза – зернами аустенита. Поэтому предел текучести стали после нитроцементации определялся по формуле:

$$\sigma = P_V^n \cdot \sigma_\alpha + P_V^r \cdot \sigma_\gamma, \quad (2)$$

где P_V^n и σ_α – соответственно, объемная доля и предел текучести α -матрицы стали, а P_V^r и σ_γ – γ -матрицы.

Используя количественные данные, полученные в работе, такие как скалярная плотность дислокаций, кривизна-кручение кристаллической решетки, размеры и плотность распределения вторичных фаз, размеры мартенситных кристаллов и зерен, а также формулы (1) и (2), была проведена оценка предела текучести различных слоев стали 20X2H4A в исходном состоянии, после нитроцементации и после последующего цикла термических обработок. Оказалось, что после нитроцементации на поверхности α -фаза

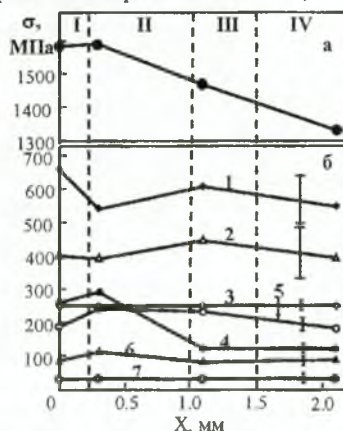


Рис. 1. Изменение предела текучести σ (а) и различных вкладов его составляющих (б) по мере удаления от поверхности нитроцементованного и затем термообработанного слоя (X) в стали 20X2H4A: 1 – упрочнение дислокациями «леса»; 2 – дальнедействующие поля напряжений; 3 – упрочнение некогерентными частицами; 4 – твердорастворное упрочнение; 5 – зернограничное упрочнение; 6 – субструктурное упрочнение; 7 – напряжение трения дислокаций в кристаллической решетке α -Fe

упрочнена более, чем в 1,5 раза. γ -фаза, отсутствовавшая до нитроцементации стали, теперь представляет из себя важную упрочняющую фазу. В целом, сталь на поверхности образца упрочнена, благодаря нитроцементации, в 2 раза. Это свидетельствует о высокой эффективности такой обработки. Помимо увеличения предела текучести в поверхностном слое, нитроцементация упрочняет материал и по глубине. Помимо увеличения предела текучести в поверхностном слое, нитроцементация упрочняет материал по глубине. В зоне основного металла α -фаза оказывается упрочненной, по крайней мере, в 1,5 раза.

Проведенный цикл термической обработки нитроцементованной стали не снизил значения суммарного предела текучести во всех слоях материала (рис.1). Как видно из рис.1, наиболее упрочненными оказываются поверхностный и подповерхностный слои (зоны I и II) материала, суммарное значение вкладов в предел текучести различаются в пределах ошибки эксперимента. Благодаря выполненной химико-термической обработке, лидирующим вкладом упрочнения явля-

ется дислокационная структура, а именно высокая скалярная плотность дислокаций «лес» (рис. 1 б, кр.1). Вклад этого механизма является самым большим на всех глубинах от нитроцементованной поверхности. Второй по значимости – дальнедействующие поля напряжений (рис. 1 б, кр.2). Основными источниками полей напряжений, согласно выполненным в настоящей работе исследованиям, являются крупные частицы вторых фаз, неравновесные границы зерен, стыки и границы мартенситных пакетов и пластин и дислокационный ансамбль. В поверхностных слоях значителен вклад твердорастворного упрочнения. Он убывает по мере удаления от поверхности. Торможение дисперсными частицами (рис. 1 б, кр.3) оказалось постоянным на любых расстояниях от поверхности упрочнения. Такой неожиданный результат обусловлен одновременным изменением плотности частиц и их размера, а также доли крупных частиц. Значителен вклад зернограничного упрочнения (рис. 1 б, кр.5). Он изменяется по глубине вследствие изменения размера зерен. Субструктурное упрочнение (рис. 1 б, кр.6) играет серьезную роль лишь в зоне II нитроцементованного слоя. Но и там этот вклад меньше большинства отдельных вкладов.

Таким образом, наибольший вклад в упрочнение при нитроцементации вносят упрочнение дислокациями «лес» и дальнедействующие поля напряжений. При этом дислокационная структура поляризована, или, по-другому можно сказать – «заряжена», т.к. скалярная плотность дислокаций соизмерима с избыточной: $\rho \approx \rho_{\pm}$. Это новый результат в физике упрочнения путем нитроцементации, и он означает важную роль дислокационного вклада в упрочнение после термообработки. Наряду с этим, важную роль в физике упрочнения путем нитроцементации играют упрочнения дисперсными частицами, твердорастворное, упрочнение мартенситными кристаллами и зернограничное.

Как отмечалось выше, параметры градиентной структуры в нитроцементованной и затем термообработанной стали сохраняются. При этом сохраняется и закономерность изменения величины предела текучести стали: при удалении от поверхности в глубь материала на поверхности (в зоне I) $\sigma = 1580$ МПа, в зоне IV (в зоне основного металла) – 1330 МПа. Благодаря нитроцементации, сталь мартенситного класса 20X2H4A достаточно упрочнена. При этом она не теряет пластичности.

Список литературы

1. Бернштейн М.Л., Спектор Я.И., Дяттерев В.Н. Влияние температуры аустенизации и горячей деформации на структуру и механические свойства стали 40XH2МА // ФММ. - 1982. - Т.53, №1. - С.68-75.
2. Козлов Э.В., Попова Н.А., Григорьева Н.А. и др. Стадии пластической деформации, эволюция субструктуры и картина скольжения в сплавах с дисперсным упрочнением // Изв. вузов. Физика. - 1991. - №3. - С.112-128.
3. Козлов Э.В., Теплякова Л.А., Конева Н.А. и др. Роль твердорастворного упрочнения и взаимодействий в дислокационном ансамбле в формировании напряжения течения азото-содержащей аустенитной стали // Изв. вузов. Физика. - 1996 - №3. - С.33-56.
4. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. - М.: Металлургия, 1979. - 208с.
5. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. - М.: Металлургия, 1982. - 179с.
6. Прнка Т. Количественные соотношения между параметрами дисперсных выделений и механическими свойствами сталей // МиТОМ. - 1975. - №7. - С.3-8.
7. Иванов Ю.Ф., Гладышев С.А., Козлов Э.В. Структурные оценки предела текучести высокопрочной конструкционной стали // Пластическая деформация сплавов. - Томск: ТГУ, 1986. - С.152-163.